水声目标探测技术研究现状与展望

黄海宁[1,2]　李　宇[1,2]
1 中国科学院声学研究所　北京　100190
2 中国科学院先进水下信息技术重点实验室　北京　100190

摘要　水声目标探测技术是水声信号处理与声呐领域的重要研究方向，是环境感知、海洋监测、资源勘探、情报收集等海洋应用领域的核心技术之一。文章概述了水声目标探测技术发展现状，并结合实际所面临的科学问题介绍了一些水声目标探测研究方向上的新概念、新方法与新趋势，最后分析和展望了水声目标探测技术发展对国家安全和经济发展的重要作用。

关键词　水声信号处理，目标探测，特征提取，环境适应性，智能化信号处理

DOI　10.16418/j.issn.1000-3045.2019.03.003

1 水声目标探测技术面临的挑战

水声目标探测技术是指通过接收水声目标辐射噪声或者散射回波，在一定范围内实现对水声目标的探测、跟踪、定位与识别的信号处理技术。水声目标探测技术是水声信号处理与声呐领域的重要研究方向，是环境感知、目标监测、资源勘探、情报收集等海洋应用领域的核心技术之一，一直是国内外研究学者重点关注的热点问题。

水声目标探测技术伴随着现代电子信息、信号处理和海洋船舶技术的进步，不断演进发展。最初的水声目标探测主要是以回波检测为手段的主动探测方式。20 世纪，经过两次世界大战后，出于对自身隐蔽性的要求，以噪声检测为手段的被动探测方式逐渐成为主要的水声目标探测体制。而近几十年来，随着现代静音技术的发展，被动目标探测距离急剧下降，从而促使主被动联合探测的方式成为水声目标探测重要手段[1]。目前，水声目标探测技术的发展正面临 3 个方面的挑战。

（1）目标辐射噪声与回波强度大幅降低。随着现代船舶工程技术的飞速发展，在过去三四十年内，舰船辐射噪声正以平均每年 0.5—1.0 dB 的速度降低（图 1）[2]，目前最先进舰船的辐射噪声水平已经接近甚至低于海洋环境噪声。此外，先进消声材料技术的进步，也使得主动探测传统工作频段上的舰船回波强度降低了 5—15 dB。

（2）海洋环境噪声大幅提高。随着人类海洋活

资助项目：国家自然科学基金青年基金项目（11504402）
修改稿收到日期：2019年3月5日

动和海底地质运动的日益频繁，过去五六十年来，海洋环境噪声尤其是低频噪声正以每年 0.2—0.3 dB 的速度增加。美国利用海底观测声学基阵对东北太平洋在 40 Hz 处环境噪声级进行持续监测，而获得的数据表明，1955—2011 年，东北太平洋海洋环境噪声正呈现出不断增加的变化趋势（图2）[3,4]。

（3）海洋环境水声效应影响显著。由于受海洋界面和水体介质的非均匀性，以及海洋独特的锋、涡、流等动力特性的影响，水声场呈现出复杂的时空随机起伏、环境不确定、信道不确实、参数不确知等特点，使得水声目标探测性能随海区环境和时间的变化而剧烈变化，著名的“午后效应”便反映了这一现象[5]。

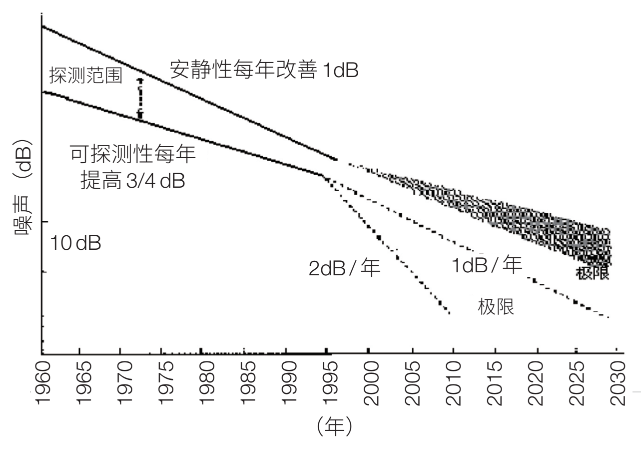


图 1　水下目标噪声性能的改善与目标探测性能提高的关系趋势 [2]

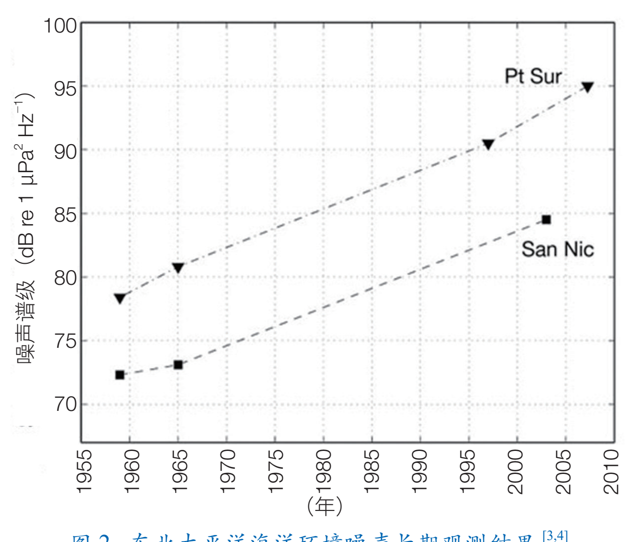


图 2　东北太平洋海洋环境噪声长期观测结果 [3,4]

综上所述，传统基于统计探测理论的水声目标探测技术很难满足现实需求，亟待发展水声目标探测新概念、新原理、新方法。本文将重点介绍基于特征的目标探测、基于环境适配的目标探测、分布式网络化目标探测、智能化目标探测等水声目标探测技术发展现状与新趋势。

2 水声目标探测技术发展现状与趋势

2.1 基于特征的目标探测技术

在复杂海洋环境下，面向越来越低的目标输入信噪比条件，如何提高水声目标探测性能是水声信号处理领域亟待解决的问题。而从目标角度出发，通过研究目标信号在产生、传播与接收过程的特征，并利用目标特征进行高增益处理，以提高对目标信号侦察与探测性能是一种自然的选择。目前，基于特征的目标探测技术发展主要包括 4 个方面。

（1）基于固有特征量的目标探测技术。所谓固有特征量，就是指目标辐射噪声中受海洋信道长距离传输影响变化较小，或即使有变化，但变化规律已知或者是可控的那一部分分量[6]。根据目标辐射噪声形成和传播机理，固有特征量往往集中在低频、甚低频段，因此此类目标探测技术主要聚焦在目标的低频、甚低频特征探测上。例如，李启虎等[7]提出的带有自适应线谱增强的单频特征信号探测技术，能够获得比传统能量探测方法更高的处理增益，有效探测具有线谱特征的微弱目标，从而有效提高了被动目标探测作用距离。

（2）矢量信号处理方法。水声场既有声压场，也有振速场，随着矢量水听器在工程上的日臻成熟，通过矢量水听器同时获取声压和质点振速矢量，为水声目标探测提供了更多维度上的目标声场特征。在自由场条件下，通过声场声压标量和质点振速矢量联合测量，可对声压、振速、振动加速度、位移、声波强度等特征进行单独或者组合检测，有效区分目标和噪

声矢量场，从而达到提高目标探测能力的目的。矢量信号处理一直是水声领域备受关注的热点问题，国内外学者在矢量阵列高分辨方位估计、左右舷分辨、低频和甚低频检测等方面进行了深入研究并确定良好效果，根据研究表明，探测信噪比可提高 5—10 dB[8]；未来研究重点主要集中在运动多目标估计、非自由场条件下矢量处理等方面。

（3）基于非高斯、非线性特征提取的目标探测技术。利用 Wigner-Vill 分布、小波变换、高阶统计、非线性等现代信号处理工具对接收数据进行分析与特征提取，然后进行探测也是基于特征探测的一个较为活跃的研究课题。其中，非高斯信号处理包括高阶统计（高阶谱估计、基于高阶累积量的 ARMA 模型估计、超定递推辅助变量法参数估计、随机梯度法参数估计等）、盲解卷、非监督自适应滤波（盲均衡器、码率盲均衡器、常数模算法）等方面[9]。非线性信号处理则包括随机共振理论[10]、基于随机统计学理论的非线性时间序列分析（非参数化模型估计、非线性 ARMA 模型参数估计等）、基于混沌动力学理论的非线性时间序列分析（嵌入维估计、相空间重构技术、分形维和 Lyapunov 指数估计、全局与局部动力学模型估计、非线性预测与降噪等）、自相似随机信号模型（分数布朗运动、分数高斯噪声、分数 Lévy 稳定运动）等方面的工作。比如，Haykin 和 Thomson[11] 提出了一种新的非平稳信号探测的思路，即非平稳环境下的信号探测问题可以转化为自适应模式识别的问题，利用 Wigner-Vill 分布等时频分析工具对数据进行二维时频分析，进行特征提取，并用神经网络进行探测。Shin 和 Kil [12]利用时频分析方法，提出了全谱信号探测方法，也是一种新思路。

（4）基于信号或噪声宽容性特征的处理方法，依赖于较少的传播信道先验知识，通过信号或噪声的依靠鉴别性特征进行处理，改善其宽容性。例如，Gingras[13]提出了一种利用传统的模闪烁指数的非确定性分量分析的方法，利用简正波模态能量的闪烁来描述在随机起伏海洋波导中的声波传播特性，并通过模态分解和利用模态闪烁指数的统计特性实现水面和水下目标的分辨。Ephraty 等[14]提出了一种基于空间稳定性的水下声源的探测方法，该探测方法只应用了较少的先验知识，即信道的边界性和加性噪声较低的空间非平稳性。

2.2 基于环境适配的目标探测技术

海洋环境的复杂性和变异性，使得经典的信号探测与估计理论很难在实际海洋信道中获得良好稳定的性能，因此需要发展与水声物理场相结合、相适配的信号处理技术。匹配场处理（MFP）就是其中一种代表性技术[15]，它是通过水声传播模型计算出的拷贝场与测量数据之间互相关，来实现对目标的探测与定位。MFP 与之后演化出的匹配模处理（MMP）、模基匹配滤波（MBMF）等方法构成了声场空时匹配处理方法的基础[16]。由于考虑到海洋环境要素，匹配处理的性能理论上要优于传统基于统计特性的探测方法。但是，早期的 MFP 均是基于确定模型的，与实际海洋环境在时间与空间上的动态随机变化不相适应。因此近几十年来，各国研究人员一直在致力于研究能够适配实际海洋环境、宽容自适应的 MFP 方法，主要有 4 个研究方向。

（1）从海洋声学建模方向出发，建立较好表征环境不确实性的声学模型。通过研究海洋学与水声学的随机建模、水声学与海洋学模型耦合等问题，分析水声信道不变特征和不确定性的表征和评估，利用海洋环境不确定性建模和声传播模型的输出，通过统计分析和概率描述等手段，建立能够较好表征环境不确实性的声学模型，以期减少模型失配对探测性能的影响[17]。如针对主动声呐探测中所遇到的信道畸变，给出了 2 种信道模型（快速衰减模型、时间扩散模型）及其探测性能的比较；提出了适用于不同条件的 3 种模型（参数确知模型、环境变量随机模型、环境变量

和源位置随机模型）及其探测方法，在低信噪比失配情况下取得了较好的探测性能。

（2）研究宽容性处理方法，通过自适应处理、环境参数搜索优化等方法，解决水声信道不确实与环境参数不确知情况下环境失配、统计失配和系统失配等问题[18]。针对宽容性处理的探测能力分析，提出了一种度量宽容性性能的量化指标，可以分析不同环境下宽容性探测能力。针对确定性失配问题，提出了多约束匹配场处理方法（MCM）、简化最小均方差方法（RMV）和邻域约束最小均方差方法（MV-NLC）等；针对不确知参数的失配情况，提出了不确定场优化处理方法（OUFP）、利用子空间特征提取的宽容性 MFP 方法、贝叶斯匹配场处理、Minimax 匹配场处理等。

（3）研究自适应模基处理（MBP）方法，这是基于数据驱动的动态模型匹配方法（图 3）[19]。此类方法首先建立一些参数不确定的模型集，利用水声时空数据根据一定处理准则进行递归估计所构建模型的参数，从而得到一个与“环境场”相匹配的“拷贝场”模型，所构建的“拷贝场”模型可以随着环境的变化而进行相应的调节，在此基础上进行目标信号的探测，从而提高了方法对环境的适配性。模基处理主要有 3 方面优势：① 它是递归的，因此可以序贯地修正对声呐和环境参数的估计；② 可以包含系统和测量噪声，这里的噪声不仅指声学噪声，也包括模型参数的输入误差；③ 其输出之一是新息序列，可以在线测试模型与数据的匹配程度，通过分析新息序列的统计特性评价处理器的整体性能。例如，Sullivan 和 Candy[16] 等提出了基于序贯探测的模基处理方法，可以在参数未知环境下自适应地探测微弱目标。

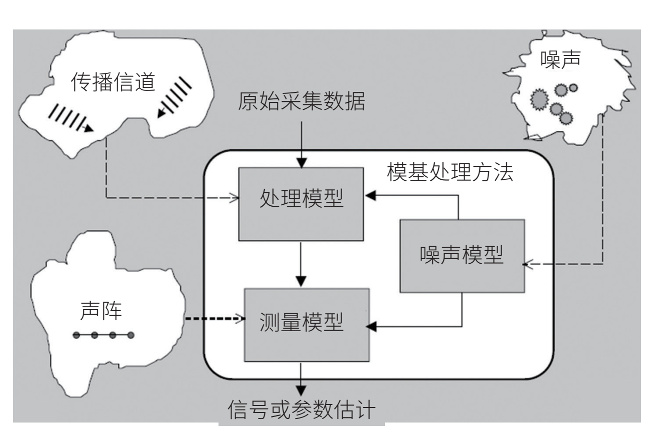


图 3　模基处理方法原理图

（4）利用信道特征（如波导不变性、时反不变性等）处理增强不确实环境下的目标探测性能。例如，D’Spain 和 Kuperman[20]研究的基于波导不变量、利用干涉结构的环境适配探测方法等，对环境参数具有较好的宽容性。时反处理也是一种适用于海洋环境不确定条件的信号处理方法，其利用基于声场的空间互易性和时反不变性，通过海洋环境本身来“自适应”地进行匹配处理，对模型失配问题具有较好的宽容性。

总之，水声环境适配处理是保证不确实海洋环境下目标探测性能稳定性的有效途径，也是今后水声目标探测技术的一个重要研究方向。

2.3 分布式目标探测技术

面对复杂海洋环境下低信噪比目标探测问题，基于现有的单平台、单基阵水声目标探测技术，难以满足当前需求。由于水声场是一种三维结构，使用在空间上分散布置的多个声基阵能够获取目标不同观测角度与传播路径的数据，有利于克服声场时空非均匀传播所导致的目标信噪比起伏问题，因此使用多平台、多基阵进行分布式探测是水声目标探测的一个发展趋势。分布式探测技术的发展主要包括 3 个方面。

（1）基于信息融合的分布式探测技术。通过对分布式节点所获取的数据和信息进行关联与融合，是经典的分布式探测技术途径。但由于声音在水中传播慢，水声传播时延的影响在水声目标分布式探测过程中不可忽略，因此分布式水声信息融合探测有其特殊性，不同于陆上基于无线电传感器网络的信息融合探测方法。此类方法主要可分为目标级融合探测和特征级融合探测 2 种。其中，目标级融合探测以各分布式节点目标探测信息为基础，结合各节点的位置、概率

统计模型等信息进行加权与关联分析，再按一定的优化融合规则（如最大似然、N-P准则等）进行全局最优判决[21]。特征级融合探测则是先提取各分布式节点数据中的相关特征与参数，再利用特征关联进行目标的联合探测。国内外研究还主要集中在目标级融合探测方面，特征级融合研究尚处在起步阶段。

（2）*基于物理基处理的分布式探测技术。*在空间分布较远的多个声基阵可以增加在三维声场空间采样的差异性和多样性，以此为基础能够进行多节点之间的空间上和时间上的物理场匹配处理，分布式匹配场是其中最典型的一类方法[22]。其根据海洋环境信息和声场预报模型，对感兴趣的目标（目标簇）的空间分布范围进行扫描，计算不同空间分布的各声基阵节点处预报的目标声场信号特征矢量，与相应的测量场信号特征矢量进行相关匹配处理，再按照一定的规则如最小二乘、最大似然比等计算全局相关匹配模糊度平面，最后进行目标的探测与定位。由于分布式物理基匹配处理技术能够在更大的空间尺度上进行“全场”匹配处理，理论上可以获得更高的空间和时间处理增益以及更高的三维定位分辨力，因此是未来最有潜力的分布式探测技术。

（3）*多基地主动目标探测技术。*分布式探测系统工作在主动模式下即是多基地。多基地概念最初来自雷达领域，引入到水声领域已有数十年时间，但在应用上很难与雷达领域相比，究其原因主要是水声传播速度慢、时延不可忽略、信道时空起伏严重，基于概率统计与忽略时延的多基地雷达探测与估计理论很难适用。因此，相关研究主要集中在利用简单声学模型（主要基于声呐方程）、结合经典统计理论与数据关联融合方法优化系统配置、探测与定位性能方面，其中探测方法与基于目标级关联融合的被动探测方法类似，未考虑主动观测周期、传播时延等的影响，其性能还是依赖于单基地探测能力，很难利用多基地特性获取额外增益。未来应关注多基地联合探测技术，利用多基地目标与信道特性，获取联合探测增益，提高弱目标探测能力。另外，目前多基地主要是“一发多收”模式，水声信道的频率选择性在一定程度上会影响主动目标探测的稳健性，而近年来兴起的“多发多收”技术，为解决这类问题提供了一个较为有效的技术途径[23]。“多发多收”技术，一方面通过不同发射节点上的波形设计和发射控制，可以减少信道选择性衰落和目标散射强度起伏对探测性能的影响，提升探测稳健性；另一方面通过能量发射分散、接收集中，可以在保证目标探测范围的同时，减少被截获的概率。

因此，随着目标探测设备由单平台集中处理向多平台协同处理方向发展，分布式目标探测技术由于融合了信号处理、分布式计算、通信网络等交叉领域技术，已经成为水声目标探测领域内日益关注的一个研究方向。

2.4 智能化目标探测技术

传统的水声目标探测，其目标判决性能受操作员的能力影响较大，有经验的操作员往往更容易检测判断出低信噪比背景下的目标。近年来，随着水下无人航行器（UUV）、水面无人艇（USV）等无人系统在水中逐渐应用，一方面，如何使无人系统在无人操作或者少人参与条件下自主探测并发现目标成为水声目标探测新问题；另一方面，伴随着以深度学习、大数据等为代表的人工智能技术迅猛发展，也为水声目标探测技术向智能化方向发展提供了契机。目前，研究方向主要有2个。

（1）*基于特征学习的自主探测技术。*面向无人系统的应用，传统的依赖于先验知识与人类经验的人工判决很难在线实现，而水声目标与环境的时空起伏特性使得传统基于统计模型的恒虚警自动判决的方式，很难在复杂多目标环境下获得理想的检测性能。因此，目前研究主要集中在基于特征学习的自主探测技术上，即通过对具有一定规律性的目标和环境特征的自适应学习，在多特征联合概率模型下检测判决[24]。

例如，对于微弱目标检测，采用跟踪或分类置前检测思想，利用目标方位、幅度、频谱等多维度特征，通过粒子滤波等算法进行基于关联学习，然后根据行为、特征差异性来进行自主探测，从而能够在低信噪比条件下获得高检测概率和跟踪精度。

（2）主动认知探测技术。在传统主动探测中，由于缺乏知识反馈机制，在复杂变化的水下环境很难获得理想的探测效果。而所谓认知过程就是将感知、处理、学习与反应密切结合的知识形成过程，因此主动认知探测技术将智能认知与主动目标探测相结合，提出了一种基于知识反馈的智能探测架构和处理形式，即通过借鉴智能认知过程，利用发射水声信号主动感知水声环境和目标信息的特点，形成对环境与目标的认知学习，并将这种知识实时反馈给探测过程中的发射和接收环节，使之与环境和目标状况相适配形成正向反馈环路，从而能够在复杂环境下获取最优主动声目标探测性能[25]。虽然主动认知探测研究尚处在起步阶段，但是为主动探测提供了新思路。

3 结语

历经数十年的发展，我国的水声目标探测技术不论在理论研究还是工程应用方面都有了长足的进步，但是与国际先进水平相比还有不小的差距。然而，因为水声目标探测技术在保护国家海上安全发挥着不可或缺的作用，所以“加快技术创新、赶超先进水平”显得更为迫切。党的十八大提出“建设海洋强国”的基本方针，为水声目标探测技术的加速发展提供了新契机，相信随着国家在人才与资金上的大力支持，通过广大科研人员砥砺奋进，能够实现水声目标探测技术的跨越式发展。

参考文献

1 李启虎. 数字式声呐设计原理. 合肥: 安徽教育出版社, 2002.

2 李启虎. 第一讲进入21世纪的声呐技术. 物理, 2005, 35(5): 402-407.

3 Hildebrand J A. Anthropogenic and natural sources of ambientnoise in the ocean. Marine Ecology Progress Series, 2009, 395: 5-20.

4 Chapman N R, Andrea Price. Low frequency deep ocean ambient noise trend in the Northeast Pacific Ocean. Journal of the Acoustical Society of America, 2011, 129(5): 161-165.

5 杨士莪. 水声传播原理. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2007.

6 Li Q H. Theoretical analysis and experiment result of interference striation pattern of underwater target radiated noise in shallow waveguide. Chinese Journal of Acoustcis, 2011, 30(1): 73-80.

7 李启虎, 李敏, 杨秀庭. 水下目标辐射噪声中单频信号分量的探测： 理论分析. 声学学报, 2008, 33(3): 193-196..

8 杨德森, 朱中锐, 田迎泽. 矢量声呐技术理论基础及应用发展趋势. 水下无人系统学报, 2018, 26(3): 185-192.

9 邱天爽, 张旭秀, 李小兵. 统计信号处理： 非高斯信号处理及其应用. 武汉: 中国水利水电出版社, 2004.

10 Gammaitioni L, Hanggi P, Jung P, et al. Stochastic resonance. Reviews of Modern Physics, 1998, 70(1): 223-287.

11 Haykin S, Thomson D J. Signal detection in a nonstationary environment reformulatied as an adaptive pattern classification problem. Proceedings of IEEE, 1998, 86(1): 2325-2344.

12 Shin F B , Kil D H. Full spectrum signal process. OCEANS. IEEE, 1995, (1): 397-403.

13 Gingras D F. Robust broadband matched-field processing: performance in shallow water. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1993, 18(3): 253-264.

14 Ephraty A,Tabrikian J, Messer H. Robust source detection. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1995, (5): 3705-3708.

15 Baggeroer A B, Kuperman W A, Mikhalecsky P N. An

overview of matched field methods in ocean acoustics. IEEE Journal of Oceanic E ngineering, 1993,18(4): 401-424.

16 Sullivan E J, Candy J V. Space-Time Array Processing: The Model-Based Approach.The Journal of the Acoustical Society of America, 1997, 102: 2809-2820.

17 Sazontov A G, Malekhanov A I. Matched field signal processing in underwater sound channels (Review). AcousticalPhysics, 2015, 61: 213-230.

18 赵航芳, 李建龙, 宫先仪.不确实海洋中最小方差匹配场波束形成对环境参量失配的灵敏性分析. 哈尔滨工程大学学报, 2011, 32(2): 200-208.

19 Candy J V. Model-Based Signal Processing. NewYork: Wiley, 2006.

20 D'Spain G L, Kuperman W A. Application of waveguide invariants to analysis of spectrograms from shallow water environments that vary in range and azimuth. The Journal of the Acoustical Society of America, 1999, 106(5): 2454.

21 相明, 韩崇昭, 赵俊渭, 等. 基于NEYMAN-PEARSON准则的最优分布式量化检测融合算法. 探测与控制学报, 2002, 24(4): 1-6.

22 高宏建, 宋笔锋. 非相关累积情况下的分布式探测系统性能分析方法研究. 西北工业大学学报, 2003, 21(2): 230-234.

23 李宇, 王彪, 黄海宁, 等. MIMO探测声呐研究. 声学技术, 2007, 26(5): 48.

24 任宇飞, 李宇, 黄海宁. 能量值和方位信息结合的粒子滤波算法. 哈尔滨工程大学学报, 2017, 38(7): 1143-1150.

25 Jason E S, Jason M T. Deep reinforcement learning for cogntive sonar.The Journal of the Acoustical Society of America, 2018, 143: 1716.

Underwater Acoustic Detection: Current Status and Future Trends

HUANG Haining[1,2] LI Yu[1,2]

（1 Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2 CAS Key Laboratory of Science and Technology on Advanced Underwater Acoustic Signal Processing, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China）

Abstract Underwater acoustic detection technology is the most important research direction on underwater acoustic signal processing and sonar filed, and is the key technology on marine applications for environment aware, ocean surveillance, resource exploration, information acquisition and so on. This paper gives a brief introduction on the current status of underwater acoustic detection. With scientific problems in practice, the new concept, new method, and new trend of this field are presented. Subsequently, the important effect of underwater acoustic detection development on national security and economic progress is analyzed and prospected.

Keywords underwater acoustic signal processing, underwater acoustic detection, feature extraction, environmental adaptive processing, intelligent signal processing



黄海宁 中国科学院声学研究所研究员，中国科学院先进水下信息技术重点实验室主任，工学博士，博士生导师，享受国务院政府特殊津贴。主要从事水声信号与信息处理、目标探测，水声通信与网络的研究。现任国防某领域多个技术专家组专家、中国造船工程学会某学术委员会专家。E-mail: hhn@mail.ioa.ac.cn

HUANG Haining Ph.D., Professor of Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences (CAS). Director of CAS Key Laboratory of Science and Technology on Advanced Underwater Acoustic Signal Processing, CAS. He is a doctoral supervisor, and enjoys the special allowance by State Council. His research interests include underwater signal and information processing, underwater acoustic detection, underwater communication and networking. E-mail: hhn@mail.ioa.ac.cn

■责任编辑：张帆

参考文献（双语版）

1 李启虎. 数字式声纳设计原理. 合肥: 安徽教育出版社, 2002.

Li Q H. Digital Sonar Design in Underwater Acoustics: Principles and Applications. Hefei: Anhui Educational Publishing House, 2002. (in Chinese)

2 李启虎.进入21世纪的声纳技术. 物理, 2006, 35(5): 402-407.

Li Q H. Sonar technology of 21st century. Physics, 2005, 35(5): 402-407. (in Chinese)

3 Hildebrand J A. Anthropogenic and natural sources of ambient noise in the ocean. Marine Ecology Progress Series, 2009, 395: 5-20.

4 Chapman N R, Price A. Low frequency deep ocean ambient noise trend in the Northeast Pacific Ocean. The Journal of the Acoustical Society of America, 2011, 129(5): EL161-EL165.

5 杨士莪. 水声传播原理. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2007.

Yang S E. Principles of Underwater Sound. Harbin: Harbin Engineering University Press, 2007. (in Chinese)

6 Li Q H, Wang L, Wei C H, et al. Theoretical analysis and experimental results of interference striation pattern of underwater target radiated noise in shallow water waveguide. Chinese Journal of Acoustics, 2011, 30(1): 73-80.

7 李启虎, 李敏, 杨秀庭. 水下目标辐射噪声中单频信号分量的检测：理论分析. 声学学报（中文版）, 2008, 33(3): 193-196.

Li Q H, Li M, Yang X T. The detection of single frequency component of underwater radiated noise of target: Theoretical analysis. Acta Acustica, 2008, 33(3): 193-196. (in Chinese)

8 杨德森, 朱中锐, 田迎泽. 矢量声呐技术理论基础及应用发展趋势. 水下无人系统学报, 2018, 26(3): 185-192.

Yang D S, Zhu Z R, Tian Y Z. Theoretical bases and application development trend of vector sonar technology. Journal of Unmanned Undersea Systems, 2018, 26(3): 185-192. (in Chinese)

9 邱天爽, 张旭秀, 李小兵. 统计信号处理：非高斯信号处理及其应用. 武汉: 中国水利水电出版社, 2004.

Qiu T S, Zhang X X, Li X B. Statistical Signal Processing: Non-Gaussian Signal Processing and Its Applications. Wuhan: China Water & Power Press, 2004. (in Chinese)

10 Gammaitoni L, Hänggi P, Jung P, et al. Stochastic resonance. Reviews of Modern Physics, 1998, 70(1): 223-287.

11 Haykin S, Thomson D J. Signal detection in a nonstationary environment reformulated as an adaptive pattern classification problem. Proceedings of the IEEE, 1998, 86(11): 2325-2344.

12 Shin F B , Kil D H. Full spectrum signal process. OCEANS. IEEE, 1995, (1): 397-403.

13 Gingras D F. Robust broadband matched-field processing: Performance in shallow water. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1993, 18(3): 253-264.

14 Ephraty A,Tabrikian J, Messer H. Robust source detection. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1995, (5): 3705-3708.

15 Baggeroer A B, Kuperman W A, Mikhalevsky P N. An overview of matched field methods in ocean acoustics. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1993,18(4): 401-424.

16 Sullivan E J, Candy J V. Space-time array processing: The model-based approach. The Journal of the Acoustical Society of America, 1997, 102(5): 2809-2820.

17 Sazontov A G, Malekhanov A I. Matched field signal processing in underwater sound channels (Review). Acoustical Physics, 2015, 61(2): 213-230.

18 赵航芳, 李建龙, 宫先仪.不确实海洋中最小方差匹配场波束形成对环境参量失配的灵敏性分析. 哈尔滨工程大学学报, 2011, 32(2): 200-208.

Zhao H F, Li J L, Gong X Y. Sensitivity of minimum variance

matched-field beamforming to an environmental parameter mismatch in an uncertain ocean channel. Journal of Harbin Engineering University, 2011, 32(2): 200-208. (in Chinese)

19 Candy J V. Model-Based Signal Processing. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc., 2005.

20 D'Spain G L, Kuperman W A. Application of waveguide invariants to analysis of spectrograms from shallow water environments that vary in range and azimuth. The Journal of the Acoustical Society of America, 1999, 106(5): 2454-2468.

21 相明, 韩崇昭, 赵俊渭, 等. 基于NEYMAN-PEARSON准则的最优分布式量化检测融合算法. 探测与控制学报, 2002, 24(4): 1-6.

Xiang M, Han C Z, Zhao J W, et al. Optimum detection fusion algorithm for distributed and quantized NEYMAN-PEARSON detection systems. Journal of Detection & Control, 2002, 24(4): 1-6. (in Chinese)

22 高宏建, 宋笔锋. 非相关累积情况下的分布式探测系统性能分析方法研究. 西北工业大学学报, 2003, 21(2): 230-234.

Gao H J, Song B F. The performance of distributed detection systems under non-coherent integration. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2003, 21(2): 230-234. (in Chinese)

23 李宇, 王彪, 黄海宁, 等. MIMO探测声呐研究. 声学技术, 2007, 26(5): 48.

Li Y, Wang B, Huang H N, et al. Research on MIMO sounding sonar. Technical Acoustics, 2007, 26(5): 48. (in Chinese)

24 任宇飞, 李宇, 黄海宁. 能量值和方位信息结合的粒子滤波算法. 哈尔滨工程大学学报, 2017, 38(7): 1143-1150.

Ren Y F, Li Y, Huang H N. Energy and angle-based particle filter algorithm. Journal of Harbin Engineering University, 2017, 38(7): 1143-1150. (in Chinese)

25 Summers J E, Trader J M, Gaumond C F, et al. Deep reinforcement learning for cognitive sonar. The Journal of the Acoustical Society of America, 2018, 143(3): 1716.